

3次元球殻マントル対流コードの並列化

Parallel Computation of 3-D Mantle Convection in a Spherical Shell

吉田 晶樹 [1], 本多 了 [2], 岩瀬 康行 [3]

Masaki Yoshida [1], Satoru Honda [2], Yasuyuki Iwase [3]

[1] 広大院・理・地惑, [2] 広大・理・地惑シ, [3] 広大・理・地惑

[1] Earth & Planet. Syst. Sci., Hiroshima Univ., [2] Dept. Earth Planet. Syst. Sci., Hiroshima Univ., [3] Dept. Earth & Planet. Sys. Sci., Hiroshima Univ.

地球・惑星のマントル内の複雑かつ局所的な諸現象を3次元でシミュレートするには、高い解像度での計算が望まれる。そのため、従来使用してきた3次元球殻内におけるマントル対流数値計算コードを改良することによって、並列計算機において複数のCPUが利用可能な並列アルゴリズムの開発が必要となる。我々は、領域分割法により計算領域である球殻内を深さ方向に分割し、小領域とした。隣接する小領域間のデータをプロセッサ間で通信を行うことによって有限体積法で離散化された代数方程式を解いた。我々の改良コードを用いた計算例では、通信による時間の損失を考慮してもプロセッサ数の増大によるパフォーマンスの向上を図ることが出来た。

従来、我々が行ってきた3次元球殻内におけるマントル対流数値シミュレーションは、最も解像度の高い計算(数100万メッシュ)においても、ベクトル計算機(スーパーコンピュータ)を用いて1プロセッサで計算されてきた。しかし、地球・惑星のマントル内の複雑かつ局所的な諸現象を3次元で扱うためには、より高い解像度での計算が望まれる。また、マントル対流の数値計算は、粘性率の変化、あるいは、レオロジーが非常に複雑であるため、1プロセッサでの計算は莫大な時間と多くのメモリーを費すことになる。そのため、従来のコードを修正・改良することによって、並列計算機において複数のプロセッサを利用できる並列アルゴリズムの開発が必要となる。一般に、「並列化」とは理想として計算量を $1/n$ (n :プロセッサの個数)に縮小することであり、その目的はパフォーマンスの向上(実時間で計算時間の短縮)と大容量のメモリーの使用にある。より大容量のメモリーを使用する必要がある計算は分散メモリー型並列計算機が有効となる。これは共有メモリー型並列計算機とは異なって、1個のプロセッサが持つメモリーだけでは不十分であっても、プロセッサ数を増やすと同時に多くのメモリーを増設することが可能である。従ってベクトルや行列を扱うときに使用する配列を各プロセッサに適度に分散させることで一つの並列ジョブで非常に大きなメモリーを使用することが出来る。

マントル対流を支配する基礎方程式は、質量保存の式(連続の式)、運動量保存式(運動方程式)、エネルギー保存式(熱輸送方程式)である。これらの方程式は、Iwase (1996) に従って有限体積法で離散化され、速度場(3成分)と圧力場はSIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 法 (Patankar, 1980) を用いて質量保存の式と運動量保存式を同時に満たすように解き、温度場はエネルギー保存式を用いて時間発展を計算する。エネルギー保存式はオイラー陽解法を用いれば行列を解く必要がなく単純な四則計算で済むため、並列化は容易である。しかし、速度・圧力場の解法で使われている緩和法はそのままでは並列化できない。ここでは、最も簡単な「レッドブラック緩和法」をアルゴリズムに適用することで並列化を可能にした。並列計算においては一般に、計算領域内を分割した小領域を各プロセッサに分配する「領域分割法」が広く用いられている(例えば、荒川, 1994)。本改良コードでは、計算領域である球殻内を深さ方向に適度に分割し、これを小領域とする。隣接する小領域間のデータをプロセッサ間で通信を行うことによって有限体積法で離散化された代数方程式を解く。この方法により、従来の計算手法やアルゴリズムをほとんど変更することなく、比較的容易に並列アルゴリズムに拡張することが可能である。各プロセッサ間のメッセージ交換ライブラリーはMPI (Message-Passing Interface) を使用した。

並列化したコードを n 個のプロセッサで実行し、1台のプロセッサの場合と比較した経過時間倍率(加速率)を n で割った値は効率と呼ばれる。我々は、開発した並列アルゴリズムのパフォーマンスの評価を行うため、科学技術庁防災科学技術研究所のT3E(分散メモリ型超並列スーパーコンピュータ, 168プロセッサ)を用いてベンチマークテストを行った。ベンチマークテストに用いた計算例は、有限体積法を $101 \times 100 \times 200$ (深さ方向 $\times$ 緯度方向 $\times$ 経度方向)で、レイリー数は 10^6 、粘性率は一様である。その結果、10ステップを解いたときの効率は、50プロセッサでは約85%、100プロセッサでは約60%となり、通信による時間の損失を考慮してもプロセッサ数の増大によるパフォーマンスの向上を図ることが出来た。これにより、今後はさらに解像度の高いマントル対流数値計算が期待できる。